

レスキューロボットに見る災害対応の取り組み

ANTI-DISASTER TECHNOLOGIES FROM RESUCE ROBOT

徳田 猷一¹
Kenichi TOKUDA

¹システム工学部助教

1995年の阪神・淡路大震災以後に開始されたレスキューロボットの研究開発は、2011年の東日本大震災および福島第一原子力発電所事故にきっかけに、地震災害だけにとどまらない災害ロボティクスへと発展しつつある。和歌山県のある紀伊半島は、南海トラフを震源とする地震による被害として、建物倒壊や津波災害が想定されているだけでなく、台風など豪雨による土砂災害が頻発する自然災害の危険性の高い地域である。本稿では、地震災害に対応するために開始されたレスキューロボットの概要を紹介し、紀伊半島における自然災害に対応するための災害対応ロボティクスについて述べる。

キーワード：レスキューロボット, 災害対応ロボティクス, 紀伊半島, 土砂災害

1. はじめに

レスキューロボット(Rescue robot)は、地震や水害などの自然災害によって被災した人間を救助することを目的として設計・運用されるロボットである。1995年の阪神・淡路大震災では、同時多発的に広い範囲で発生した建物の倒壊により瓦礫内に閉じ込められた要救助者の救出が最初の課題となった。このような倒壊家屋を対象とした救助活動では、被災者の探索、瓦礫掘削および被災者の救出の作業が必要である。これらの作業のうち、被災者の探索が救助活動を行う者にとって危険が大きい。そのことから、レスキューロボットの目的は人命探索とされた。レスキューロボットのシステムは、人命探索のためのセンサ、センサ搭載したロボット本体の移動機構、遠隔操作のためのユーザインタフェースおよび通信技術の各要素により構成されるようになった。2011年の東日本大震災および「福島第一原発事故」（福島第一原子力発電所の事故）以降は、レスキューロボットの特徴である遠隔操作により被災者の探索を行うロボットシステムを拡大して、人間が入ってはいけな危険な場所での観測や作業を目的とした災害対応ロボットシステムとして発展しつつある。

レスキューロボットを包含する災害対応ロボットシステムは、遠隔操作により災害現場の観測および各種作業を行うことを目的としており、探索における二次災害の危険性は、地震や原子力発電所事故現場だけではなく、

土砂災害や火山による災害現場など、多くの災害現場での活動への応用が期待されるようになってきた。

本稿では、レスキューロボットの概要について述べ、和歌山県のある紀伊半島で頻発する土砂災害に対応するための災害対応ロボット技術について紹介する。

2. レスキューロボットとは

まず、レスキューロボットの歴史について述べ、レスキューロボットの基本システム構成の説明を行う。その後、日本国内における研究開発の方向性を示す重要なものとして、国際レスキューシステム研究機構の活動およびロボット競技についての紹介を行う。

(1) レスキューロボットの歴史

阪神・淡路大震災をきっかけに始まったレスキューロボット研究開発は、調査研究、研究開発・啓蒙活動、災害対応ロボティクスへの発展の3つの段階に分けることができる。

a) 調査研究（1995年～2000年頃）

阪神・淡路大震災をきっかけに、災害発生後の対応技術としてレスキューロボットが提案された。具体的な活動として、1996年に日本機械学会ロボティクスメカトロニクス部門において「救助ロボット機器の研究開発に資することを目的とした阪神淡路大震災における人命救助の実態調査研究会」（略称：レスキューロボ



図-1 阪神・淡路大震災の被災地

ット機器研究会)により調査研究が始まり、1997年に報告書がまとめられた¹⁾。この調査研究では、人命救助活動の実態についての調査が行われ、レスキューロボット機器に対する要求とその仕様がまとめられた。その結果、探索技術の開発の必要性が明らかにされた。

これ以降、日本機械学会だけではなく、日本ロボット学会、計測自動制御学会などを中心とした調査研究が行われ、既存技術の組み合わせにより救助システムとして統合するシステムインテグレーション手法によるレスキューロボット開発が行われるようになった。

また、啓蒙、教育活動を目的とした「レスキューロボットコンテスト」や、ロボットの実用性を高めることを目的とした「ロボカップレスキュー・ロボットリーグ」の提案が行われた。

b) 研究開発、啓蒙活動(2001年～2010年頃)

2001年には、レスキューをテーマとしたロボットコンテストである第1回レスキューロボットコンテストが大阪国際会議場で開催され、高校生、高専生、大学生などによる12チームが参加した。また、ロボカップレスキュー・ロボットリーグが2001年にシアトル(アメリカ)大会から加わり、国内においては2002年に福岡で開催されたロボカップ世界大会の一競技として開催された。レスキューロボットコンテストおよびロボカップレスキュー・ロボットリーグの詳細は後述する。

2002年からは文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクト(略称: 大大特プロジェクト)(図-2)が5年間のプロジェクトとして開始され、国際レスキューシステム研究機構(IRS, International Rescue System institute)を中核として実用レベルのロボットシステム実用化が進められた。

実用化にあたっては探索活動の対象を瓦礫上(図-3)、瓦礫内(図-4)、空中(図-5)の3エリアとし、そして通信システムの構築が進められた²⁾。

c) 災害対応ロボティクスへの発展(2011年以降)

国内のレスキューロボット技術は大学・研究機関により進められた研究・開発の結果、レスキューロボットの実用技術が高まっていた。後に福島第一原子力発電所事



図-2 大大特プロジェクトの発表風景



図-3 大大特プロジェクトで開発された瓦礫上システム例



図-4 大大特プロジェクトで開発された瓦礫内システム例



図-5 大大特プロジェクトで開発された空中システム例

故の探索に用いられたQuince³⁾は、それまでにロボカップレスキュー・ロボットリーグにおいて優秀な成績をおさめていたレスキューロボットであった。

しかし、2011年の東日本大震災および福島第一原子力発電所事故によって国産ロボットの活用がなされる体制がないことが明らかになった。そのため、国産ロボットの活用を進めるため、超学会を越えた組織として「対災害ロボティクス・タスクフォース」(ROBOTAD)が設立された⁴⁾。

災害対応ロボティクスの対象として、原子力発電所の廃炉技術の確立および自然災害対応を目指して開発が進

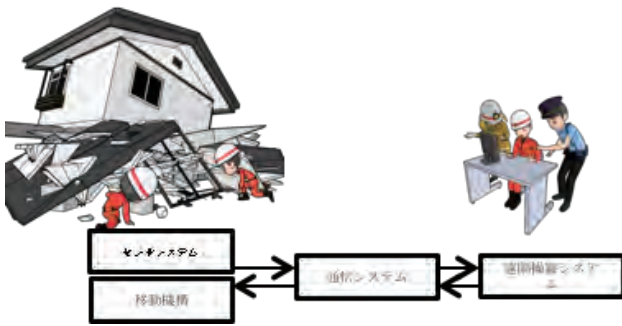


図-6 レスキューロボットの基本構成と役割

められている。日本ロボット学会において設けられた東日本大震災関連調査研究委員会および災害関係記録作成分科会では、原子力発電災害対応のロボット技術視点の記録を目的とした報告書、災害関連対応のロボット技術視点の記録を目的とした報告書がまとめられた。

(2) レスキューロボットのシステム構成

レスキューロボットは人命救助を目的としており、その運用は発見、掘削、運搬とされたが、不足する技術を検討する中で、人命探索がもっとも困難な課題として取り組まれている。レスキューロボットの基本構成は、センサシステム、移動機構と遠隔操縦システム、そしてそれらをつなぐ通信システムから構築されている（図-6）。

a) センサシステム

被災者発見および現地の観測のために、可視光、音響、電磁波、ガスを探知するセンサを、災害現場によって選択し搭載される。

また、ロボット遠隔操縦のために必要な周囲の映像を得るためのカメラ装置、ロボットの姿勢や傾斜、位置を知るための傾斜計やGPSなどが必要であり、ロボット設計時に搭載されるように設計される。

b) 移動機構

瓦礫上の移動には、一般に「キャタピラ」と知られるクローラ機構、車輪機構が多く使用されている。瓦礫踏破性能を向上させるために、クローラ機構や車輪機構を複数搭載し組み合わせることが一般的である。

瓦礫内の移動では、クローラ機構を多数組み合わせた蛇型ロボットの他、柔軟な繊維を振動させて狭隘な瓦礫内を進むことのできる機構などがある。

空中では、飛行船やヘリコプターによる移動機構が開発され、特に近年では複数の回転翼を組み合わせたマルチコプターが普及している。

c) 遠隔操縦システム

ロボット分野では情報量の大きいリモートブレインや分散コンピューティングを基礎とした遠隔操縦技術の研究が進められていた一方、建設機械分野における無人施工技術が実用に供されている。レスキューロボットの遠隔操縦においては、搭載されるセンサ機器の操作、移動の操作が複雑であることから、ロボット本体で簡易な処



図-7 レスキューロボットコンテスト出場ロボット
(レスキューロボットコンテスト実行委員会提供)



図-8 レスキューロボットコンテストプレ大会
実行委員メンバー（前2列、右から2番目が筆者）

理を行った結果を人間操縦者に提示する半自律制御システムとして開発されている。特に、ロボットが災害現場で安全に運用されるためのシステム設計が重要である。

d) 通信システム

災害現場での各種の障害物を避けるためには、無線による通信システムが望ましい。しかし、その一方で通信断絶による制御できなくなる恐れがある場合、あるいは高解像度の映像伝送の必要がある場合は有線による通信が行われる。無線においては、災害現場で同時に運用される他の救助システムとの通信システムの調整および統合が必要であり、調査研究が進められている。

(3) レスキューロボットの競技会

ロボット競技を行う目的のひとつに技術向上がある。競技会を通して競技参加者同士が技術やアイデアの交換を行うことができ、競技会のルールで設定された目的に沿ったロボット技術および設計の進歩が期待される。ここで取り上げるレスキューロボットコンテスト⁵⁾およびロボカップレスキュー・レスキューロボットリーグは、こうしたロボット競技のひとつであり、国内におけるレスキューロボットの教育・啓発および技術の発展に寄与している。

a) レスキューロボットコンテスト

日本機械学会の大規模災害救助ロボットシステムの開発研究分科会に設定された「創造性教育を通じたレスキュー技術発展の可能性」において、レスキューを題材とした技術コンテストの方法が提案され、レスキューロボットコンテストとして、2000年にプレ大会が開催さ

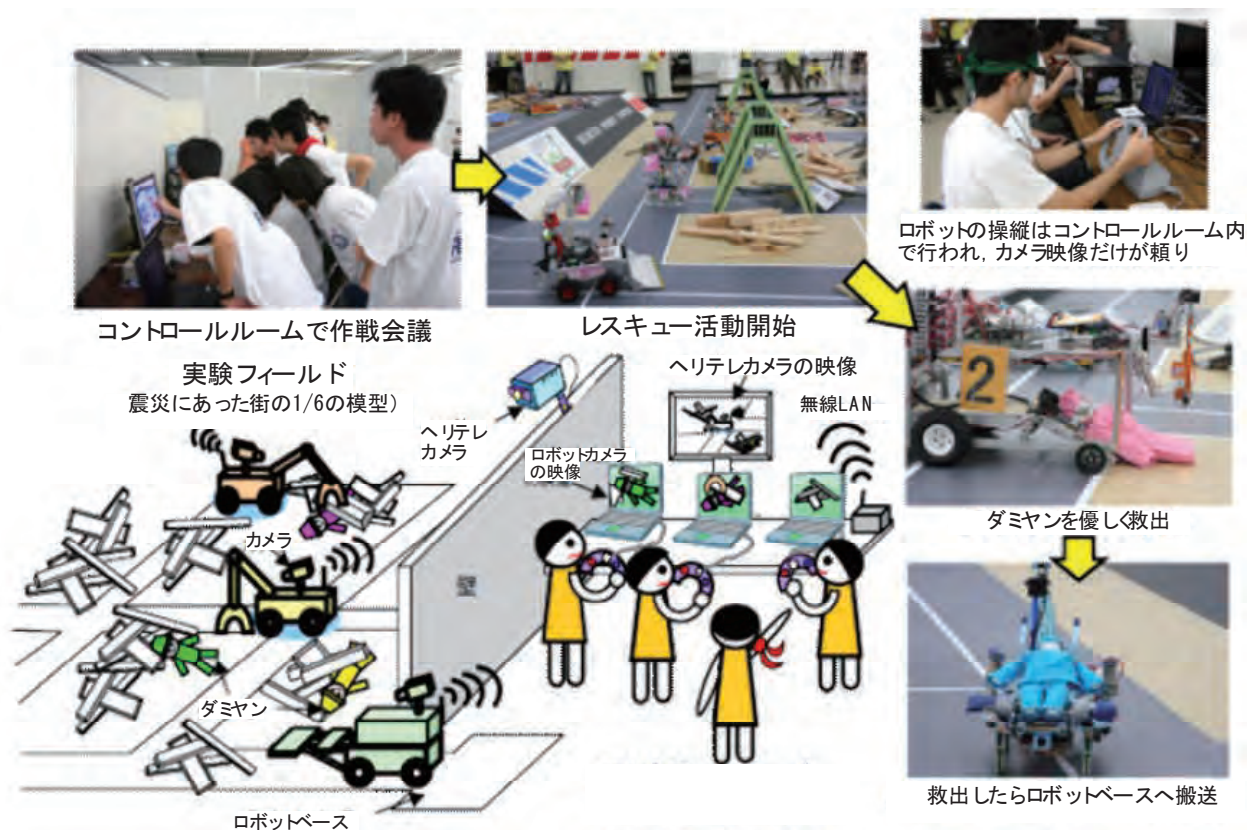


図-9 レスキューロボットコンテスト概要図（レスキューロボットコンテスト実行委員会提供）

れた。そして2001年以降、毎年8月に開催されている災害救助を題材としたロボット競技である。開催のためには関西圏の大学、高専のメンバーを中心とした実行委員会が組織された（図-8）。

6分の1スケールの被災地を模した倒壊した瓦礫の中に閉じ込められた要救助者人形「ダミヤン」を救助する競技であり、倒壊した瓦礫の並ぶ「実験フィールド」と操縦者がロボットを操作する「コントロールルーム」から構成されている（図-9）。操縦者は、直接ロボットを目視して操縦することができないため、ロボットに搭載されたカメラ等のセンサによりロボットを遠隔操作する。また、救助対象のダミヤンには手荒い扱いを検知するセンサが搭載されているため、救助者は人間の被災者を扱うような優しい救助方法が求められている。

ルールで定められていない事項への対応については、救現場での実際に即して判断することが求められていることが特徴である。そのため、当初は、ダミヤンを効率良く救出し高い得点を獲得することのできるロボットの製作を行っている参加者も、レスキュー現場の状況を調査し、それに適したロボットのアイデアを考えるうちに、点数では評価されないロボットのアイデアを出すようになってきた。

b) ロボカップレスキュー・ロボットリーグ

2001年のシアトル（アメリカ）の世界大会からロボカップのひとつの競技として行われるようになった。実物大の仮設の災害現場において、レスキューロボット実

機によって災害救助活動の速度と精度を競う競技である。具体的には、救助フィールドから離れた場所に隔離されたロボット操縦者が遠隔操作によりレスキューロボットを操縦し、フィールド内に複数置かれた被災者を模した人形を探索し、その人間の位置や状況を正確に地図として記録する競技である。探索はカメラ画像以外の複数のセンサによって確認しなければならない。また、人形も成人だけではなく、身長、性別など様々なものが用意され、救助現場での実際に即して判断することが求められている。

国内においては、2002年のロボカップ世界大会（福岡）で初めて実施され、木造家屋の倒壊現場を模した実物大フィールド（図-10）での競技が行われ、日本、アメリカ、イランなどのチームが参加した（図-11）。

この競技により、ロボットの踏破性能の向上および実用的な運用能力の向上が図られ、Quinceなどの実用的なロボットの開発が進められる原動力となってきた。

3. 和歌山県に期待される救助ロボット

(1) 土砂災害対応ロボット技術

土砂災害が起きた際の運用されるロボット技術のイメージを図-12に示す。地震災害時と同様にクローラ型ロボットによる遠隔操作がなされる想定であるが、環境条件である足場が、瓦礫が堆積して不安定であることに

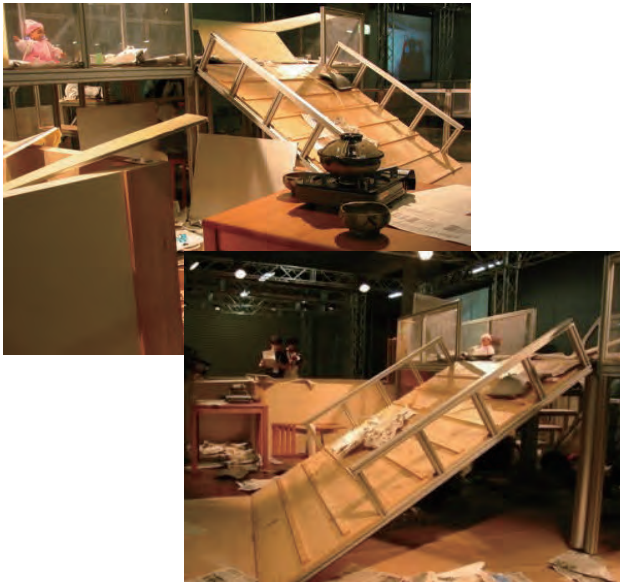


図-10 ロボカップレスキュー・ロボットリーグの福岡大会での競技フィールド



図-11 ロボカップレスキュー・ロボットリーグの参加者

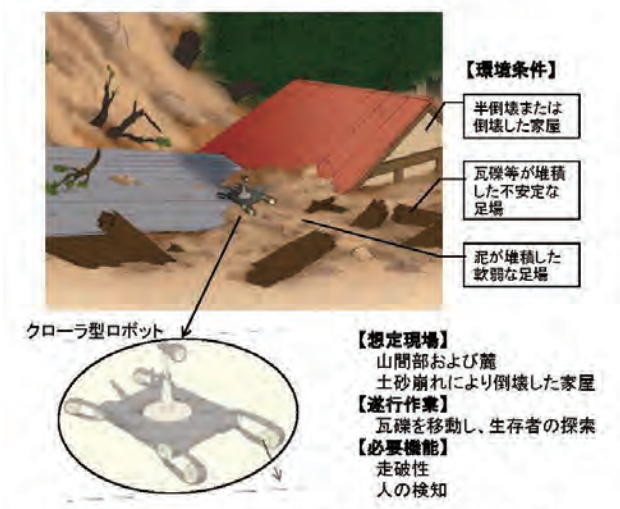


図-12 土砂災害による倒壊現場でのロボット活用イメージ(「災害対応ロボットセンター設立構想」⁶⁾より引用)

加え、泥が堆積した軟弱であることが異なる。

(2) 和歌山大学における救助ロボットの取り組み

a) 問題設定

和歌山県は台風などによる暴風雨が頻発し、土砂災害が毎年ように発生している。和歌山大学におけるロボット開発において、対応する土砂災害の状況を暴風雨下での観測活動としている(図-13)。土砂災害発生の危険性が大きい豪雨が発生した際、土砂崩れや河川の氾濫の危険性の高い場所では、二次災害の危険性が高い。このような場所でのロボットの課題は、軟弱な足場での移動技術の開発と、豪雨下でのカメラなどによる観測技術の開発である⁷⁾。

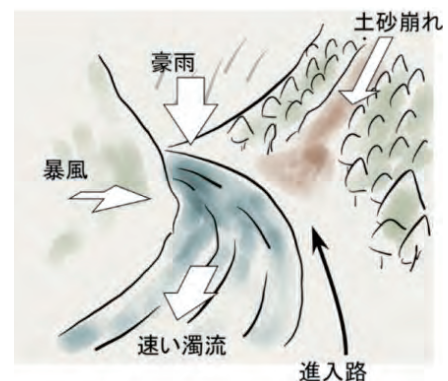


図-13 暴風雨下でのロボット活用現場イメージ

b) 軟弱な足場上での移動技術

和歌山大学におけるロボット研究開発は、軟弱な足場での対応および遠隔操縦のための画像処理を中心として行い、そのための制御システムの開発を行っている。

軟弱な足場に対応するため、地面との接触状態の制御を行わなければならない。人間の歩行においては、地面の様子を足で探る「足探り」を行っているが、この「足探り」をロボットに行わせるための、足裏センサの開発と運足(地面に対する足の踏みつけ方法)の制御について開発に取り組んでいる(図-14)。その成果の一部は、車輪やクローラ機構ではスタックするような路面に対して、足場となる固い地盤を探し出す足探り機構として実現した。

また、水分を多く含む泥濘地に対応するため「かぎづめ」をロボットのつま先に取り付けての歩行の研究を行っている(図-15)。この研究開発において、土砂災害発生時の泥濘地盤の構成メカニズムを解き明かし、泥濘地での滑りや沈み込みを抑止する移動メカニズムの実現を目指している。

c) カメラ映像内の異物除去のための画像処理技術

災害現場において、遠隔操縦用カメラの前の異物を取り除くことが必要である。既存技術としてレンズ上の雨滴像を取り除くなどがあったが、岡山理科大学と和歌山大学、消防研究センターで開発している柔軟全周囲ク



図-14 軟弱な足場対応ロボット試作機



図-15 ロボット脚先に装着する鉤爪評価用モデル



図-16 柔軟全周囲クローラ（FMT）システム

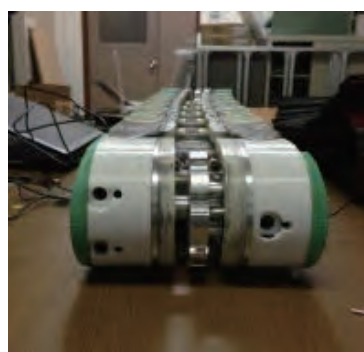


図-17 和歌山大学が研究分担する前面カメラシステム

ローラの視覚装置の開発を行った（図-16, 図-17）。この視覚システムでは、カメラ前を通過する履板（クローラの一部）の像を取り除く必要があるが、複数のカメラからの映像を用いて互いに補完し、この異物を取り除いている。この技術は、ロボット搭載の各種構造物の像を映像中から取り除くことに貢献できると期待される。

4. おわりに

本稿では、レスキューロボットの成り立ちについて、1995年の阪神・淡路大震災以降の研究開発の立場から概観し、2011年の東日本大震災以降に注目された自然災害に対応するためのロボット技術について紹介を行った。

レスキューロボットの開発は、災害が起こった直後には注目を浴び研究開発が促進されるものの、数年も経過すると縮小し、また次の災害が起こって再び注目されるという特徴がある。そのため、継続的な研究開発を続ける工夫として、学会等を通じた調査研究の継続および啓発・教育活動が重要である。特にロボット分野においてはレスキューロボットコンテストおよびロボカップレスキュー・ロボットリーグの果たす役割は大きい。

今後の和歌山での災害対応を行う上でも、災害の記憶を風化させないための取り組みとしての、ロボット競技や学会での調査研究は重要である。レスキューロボットの研究開発は、災害対応ロボット技術の可能性の追求だけでなく、技術の発信を通して災害が発生した際に起こりうる事態への備えの重要性を喚起するものと考えて

いる。

参考文献

- 1) 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス部門研究会：救助ロボット機器の研究開発に資することを目的とした阪神淡路大震災における人命救助の実態調査研究会報告書，127pp.1997.
- 2) 文部科学省：レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発，大都市大震災軽減化特別プロジェクト総括成果報告書，pp. 189-228, 2007.
- 3) T. Yoshida, K. Nagatani, S. Tadokoro, T. Nishimura, E. Koyanagi : Improvements to the rescue robot Quince - Toward future indoor surveillance missions in the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant -, Proc. of the 8th International Conference on Field Robotics (FSR2012), vol. 92 of Springer Tracts in Advanced Robotics, pp.19-32, 2012.
- 4) 浅間一：福島原発事故および廃炉対策におけるロボット技術の活用，日本機械学会誌，Vol. 117, No. 1151, pp.648-651, 2014.
- 5) 大須賀公一：レスキューロボットコンテスト，日本機械学会誌，Vol. 103, No. 977, pp.75-76, 2000.
- 6) 産業競争力懇談会：災害対応ロボットセンター設立構想，2013年度プロジェクト最終報告，33pp. 2014.
- 7) K. Tokuda: The Application of Robot Technologies to Disasters from Torrential Rains on Japan's Kii Peninsula, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.26, No.4, pp. 449-453, 2014.

(2015. 1. 9受付)